

舰船宽带连续谱噪声的模拟

向辉平, 罗 建, 傅瑞锦

(西北工业大学航海学院, 西安 710072)

摘要: 首先对舰船辐射噪声信号的时域特性和频域特性进行了分析讨论, 根据噪声的连续谱特性, 提出了一种用 FIR 滤波器实现宽带噪声信号模拟的方法。由于舰船宽带信号的连续谱在高频段具有 -6dB/oct 的衰减特性, 因此该 FIR 滤波器的幅频响应也要与此一致, 且为线性相位, 即该滤波器的频率响应要具有特定的形状。采用了自适应方法很方便地实现了该特定频率响应 FIR 滤波器的设计, 再将高斯白噪声信号通过该滤波器即实现宽带噪声信号的模拟。仿真结果表明, 该方法较真实地模拟出任意给定频域特征的宽带连续谱噪声信号。

关键词: 舰船辐射噪声; 自适应滤波器; 宽带连续谱噪声

中图分类号: TN911.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3060(2005)-03-0140-04

Simulation of broadband ship noise with continuous spectrum

XIANG Hui-ping, LUO Jian, FU Rui-jin

(College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The time-domain and frequency-domain features of ship radiation noise are analyzed. According to the frequency-domain feature of the noise with continuous spectrum, simulation of the broadband noise with white noise and an FIR filter is presented. Base on the theory of linear systems, the FIR filter should possess a specific frequency response to match the required spectrum of ship radiation. A special frequency response FIR is designed using an adaptive method. The ship's broadband continuous was obtained using such a simulation system, showing that the method is effective.

Key words: ship's radiation; adaptive filter; broadband noise; continuous spectrum

1 引 言

在实际的水声信号处理领域中, 舰船在海水中的辐射噪声信号一直是人们研究的热点, 它是被动式声探测设备的唯一信息来源, 这一信息可用于对舰船目标进行声探测、识别以及对目标的定向、定位和跟踪等。在对舰船目标进行被动定位等的研究中, 舰船噪声信号的模拟一直是水声及水声对抗研究人员所密切关心、想要解决的一个重要问题。目前, 舰船辐射噪声信号的模拟有很多方法, 文献[1]中介绍了一种产生具有特定的幅度概率分布和功率谱形状

的随机序列的方法——FFT-CT 法, 即先用 FFT 方法得到合乎要求的谱特性的随机序列作为参考序列, 然后利用相关传递法(CT 法)使具有给定幅度概率分布的基础序列具有与参考序列相同的谱特性。该方法只能产生样本点数为 2 的整数幂的序列, 即序列长度受到限制, 无法连续生成随机噪声。

本文提出了一种用特定频响 FIR 滤波器进行舰船宽带连续谱噪声模拟的方法, 该方法能产生任意长度的给定功率谱形状的噪声信号, 模拟产生的舰船噪声功率谱特性与由经验公式推导的结果基本一致。

2 舰船辐射噪声特性

水中航行舰船的辐射噪声通常由以下三部分组成: ①机械噪声(由主机、辅机等引起); ②螺旋桨噪

收稿日期: 2004-05-25; 修改日期: 2004-07-11

基金项目: 西北工业大学“英才培养计划”基金项目

作者简介: 向辉平(1980-), 女, 湖南常德人, 硕士研究生, 研究方向: 水下通信及信息处理。

声(螺旋桨上或其附近的空化、旋转声以及“唱音”);
③水动力噪声(由水流辐射、附件共振等产生)。在大多数情况下,机械噪声和螺旋桨噪声是舰船噪声的主要辐射噪声源。

2.1 时域特性^[2]

舰船辐射噪声为不确定性信号,其主体是宽带随机信号,有时也包含谐波成分。其不确定性在时域波形上表现得最明显。当包含谐波时,其频率主要决定于主电机的转速与槽数、螺旋桨轴频与叶片数等,还与航速等工况有关,而振幅则具有极大的起伏性。因此,舰船辐射噪声的时域特征之一是既不能用精确的时间函数预测未来,也不能准确地重现过去。为了用统计参数来描述,通常假定舰船辐射噪声主体为平稳的,各态历经的随机过程。

2.2 频率特性^[2]

总体上讲,舰船辐射噪声的频谱由连续谱和线谱组成,基本特性如下:

(1) 连续谱的主要频段从几赫兹到数万赫兹,低端为6dB/oct~12dB/oct的正斜率,高端为-6dB/oct左右的负斜率,在几十至几百赫兹之间出现平直谱或峰值;

(2) 线谱集中在次声和低声频段,少数情况会延伸到1kHz附近;

(3) 声级随距离的衰减量与水深和底质有关,但远场一般近似为6dB/oct。

在低速时,低频段主要为机械噪声和螺旋桨叶片速率线谱,随着频率增高,线谱逐渐被连续谱所掩盖。若叶片共振或存在噪声较大的减速器,则螺旋桨连续谱会叠加一条或一组高频谱线。

在高速时,螺旋桨噪声增大,由空化产生的连续谱占主导地位,并移向低频,掩盖了很多线谱。同时,某些谱线能级增大,频率升高,而其他由恒速运转的辅机产生的谱线不变,不受航速增加的影响。

根据上述对舰船噪声的时域和频率特性分析,功率谱作为频域统计参数之一,最能反映随机信号的频率结构,比较适用于舰船辐射噪声连续谱分量的模拟。因此,本文将从舰船辐射噪声的频率特性出发,采用特定频率响应滤波器进行舰船辐射噪声宽带连续谱分量的模拟。大量的统计资料表明,舰船连续谱噪声可以用宽带平稳随机过程来拟合,可将高斯白噪声序列通过一低通滤波器,再将其输出通过一个满足噪声频谱特性要求的特定频率响应的滤波

器来产生^[3]。其模拟框图如图1所示。

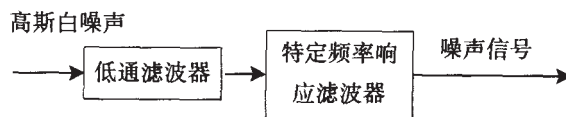


图1 宽带连续谱噪声模拟框图

Fig.1 Block diagram of broadband continuous spectrum noise

3 计算机模拟

3.1 高斯白噪声的模拟产生

从图1可以看出,首先我们需要得到具有一定分布的白噪声序列。高斯白噪声随机序列的产生方法采用Box-Muller方法^[1]:

设 β_1, β_2 为两个相互独立的在(0,1)上服从均匀分布的随机数,则

$$n = (-2 \ln \beta_1)^{1/2} \cos 2\pi\beta_2 \quad (1)$$

式(1)是服从 $N(0,1)$ 分布的随机数,其幅值服从高斯分布,且具有纯白的功率谱。图2(a)为用上述方法产生的白噪声序列,图2(b)为其功率谱。

3.2 特定频率响应FIR滤波器的设计

特定频率响应滤波器的设计是进行舰船辐射噪声模拟的关键。对于特定频率响应滤波器,采用自适应模拟技术^[4]来完成。为了设计一种滤波器使其具有某一特定的频率响应,可以先在所要求的频段范围内选取若干个离散频率 f_1, f_2, \dots, f_M (都表示数字频率),使滤波器在这些离散的频率上具有给定的幅频响应和相频响应。其基本的设计思想如图3所示。

设在输入端输入频率分别为 f_1, f_2, \dots, f_M 的正弦波信号

$$x_i = \sin(2\pi f_i n) \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2)$$

则滤波器的输出,即自适应滤波器的期望响应相应地为

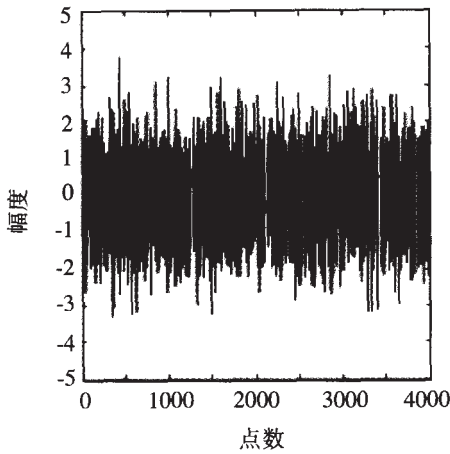
$$d(n) = \sum_{i=1}^M a_i c_i \sin(2\pi f_i n + \theta_i) \quad (3)$$

其中, α_i 和 θ_i 分别为期望得到的FIR数字滤波器在频率 f_i 处的幅度响应和相位响应, c_i 为正常数,是对频率分量 f_i 的代价因子。

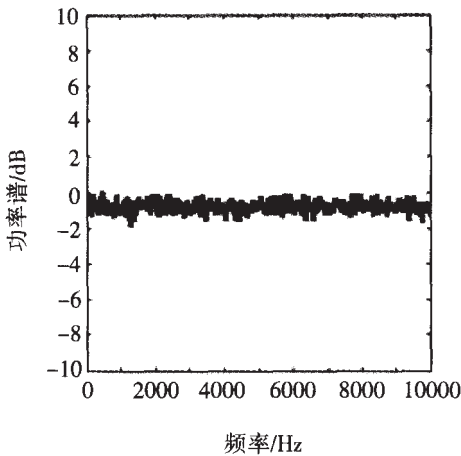
自适应滤波器的输入信号为

$$x(n) = \sum_{i=1}^M c_i \sin(2\pi f_i n) \quad (4)$$

设自适应FIR滤波器的权系数为 W ,则图3中的自适应滤波器的输出信号为 $y(n) = X^T(n)W, X(n)$



(a) 白噪声序列(White noise sequence)



(b) 功率谱(Power spectrum)

图2 高斯白噪声仿真结果

Fig.2 Simulated result of Gaussian white noise

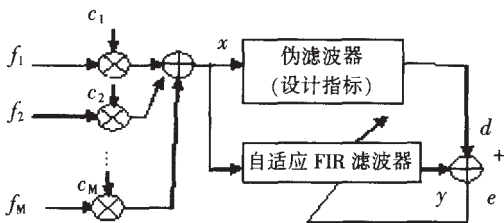


图3 特定频率响应滤波器设计框图

Fig.3 Block diagram of the special frequency response filter

$= [x(n), x(n-1), \dots, x(n-L)]^T$, 这里 L 为滤波器的阶数。由 Wiener-Hopf 方程, 该滤波器的最优解为

$$W_{opt} = R_x^{-1}P \quad (5)$$

其中, R_x 为输入信号的自相关矩阵, P 为期望信号与输入信号的互相关矩阵。

采用 LMS 自适应算法逼近 W_{opt} , 有

$$e(n) = d(n) - y(n) = d(n) - X^T(n)W \quad (6)$$

$$W(n+1) = W(n) + 2\mu e(n)X(n) \quad (7)$$

其中, μ 为步长因子, $0 < \mu < 1/\text{tr}(R_x)$ 。当 W 收敛时, $W \approx W_{opt}$ 。

为了得到期望滤波器的幅频响应和相频响应, 根据舰船辐射噪声的频率特性, 我们采用以下简化模型来逼近舰船功率谱中的连续谱结构。首先确定功率谱峰值频率, 假定了舰船航速在 40kn 以下, 峰值频率在 100Hz~800Hz 之间均匀变化, 峰值频率随航速增加而降低, 在高于峰值频率的频带内, 功率谱以 -6dB/oct 下降, 这样连续谱模型的功率谱级^[5]表示为

$$SL_f = SLf_0 = SL_s + 20 - 20\log(f_0), f \leq f_0 \quad (8)$$

$$SL_f = SL_s + 20 - 20\log(f), f > f_0 \quad (9)$$

式中: SL_f 是功率谱级(源谱级), SL_s 是 100Hz 以上的总声级, f_0 是峰值频率。

SL_s 的定义如下:

对于 3000t 以下、航速为 8kn~24kn 的舰船, 其 100Hz 以上的总声源级^[5]可使用经验公式表示:

$$SL_s = 112 + 50 \log(v/10) + 15 \log(DT) \quad (10)$$

$$SL_s = 134 + 60 \log(v/10) + 9 \log(DT)$$

式中, v 代表航速(单位:kn);

DT 代表吨位(单位:t);

4 模拟仿真结果

根据 3.2 节中的简化模型, 以航速为 20kn, 吨位为 10000t 的舰船为例, 其辐射噪声的连续谱的平均功率谱形状设定如图 4 所示。利用特定频率响应滤波器的设计方法得到的期望滤波器的频率响应如图 5 中的“★”所示, 设计出的滤波器的频率响应如图 5 中的实线所示。从图中可见, 设计的滤波器的频率响应与期望响应几乎吻合, 能够满足设计的需求。

将高斯白噪声通过特定频率响应 FIR 滤波器, 产生的舰船宽带连续谱噪声序列如图 6(a)所示, 图 6(b)是其对应的 100 次平均功率谱。

5 结 论

利用本文的自适应方法设计特定频率响应滤波器, 可以很方便地实现任意给定功率谱形状的舰船宽带连续谱噪声信号的模拟。仿真结果表明, 该方法较真实地模拟出了宽带连续谱噪声信号, 是一种有效实用的方法。

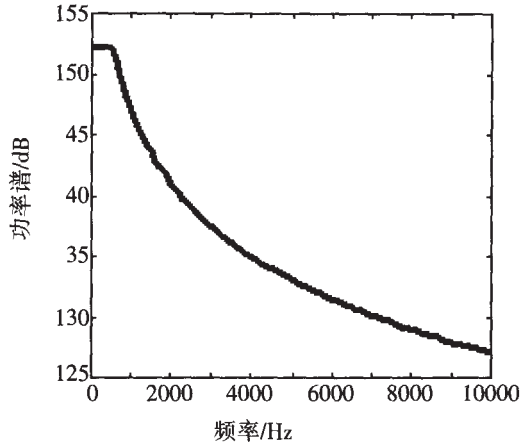
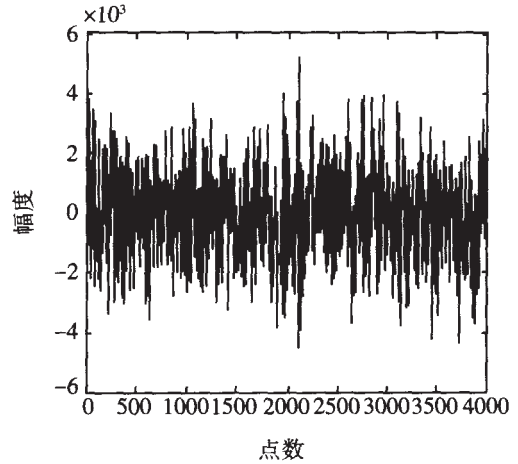


图 4 舰船连续谱噪声功率谱

Fig.4 Ship's continuous noise power spectrum



(a) 噪声序列(Noise sequence)

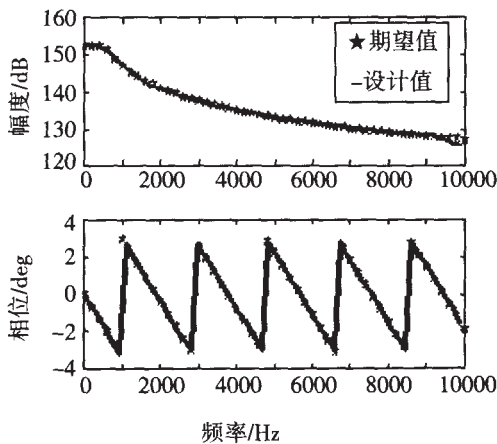
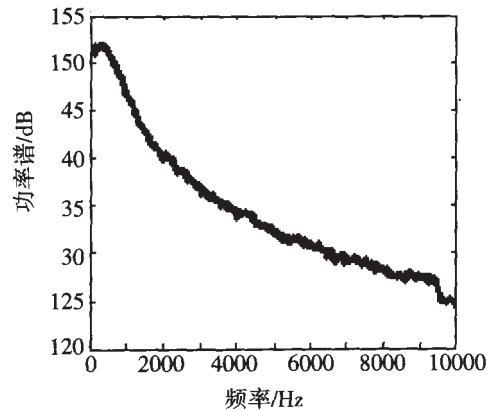


图 5 FIR 滤波器频率响应

Fig.5 Frequency response of FIR filter



(b) 平均功率谱(average power spectrum)

图 6 舰船宽带连续谱噪声仿真结果

Fig. 6 Simulated result of ship' broadband continuous spectrum noise

参 考 文 献

[1] 陶笃纯. 噪声过程的计算机模拟[J]. 声学学报,1986, 11(6):367-372.
TAO Duchun. The computer simulation of noise process [J]. ACTA ACUSTICA, 1986,11(6): 367-372

[2] 肖心敏. 舰船辐射噪声主动模拟技术研究[J]. 舰船科学技术,2002,24(2):29-35.
XIAO Xinmin. Active simulation technique research of ship's radiation noise[J]. Ship Science and Technology, 2002, 24(2): 29-35.

[3] 鄢社峰,马远良. 一种海洋宽带噪声场数值模拟方法[J]. 声学技术,2003,22(1): 30-32.

YAN Shefeng, MA Yuanliang. A numerical method for simulating broadband undersea noise field for hydrophone array[J], 2003, 22(1):30-32.

[4] 王永德,龙宪惠译. 自适应信号处理[M]. 成都:四川大学出版社,1991.165-175.
WANG Yongde, LONG Xianhui(translation). Adaptive signal Processing [M]. Chengdu: Sichuan University Press, 1991.165-175.

[5] 王之程,陈宗岐. 舰船噪声测量与分析[M]. 国防工业出版社,2004.24-27.
WANG Zhicheng, CHENG Zongqi. Warship Noise Measuring and Analyzing [M]. National Defence Industry Press, 2004.24-27.